Los Caminos hacia la Luna

La mayoría de los observadores cree que la nueva carrera lunar se trata de llegar primero. Se equivocan.

La historia no siempre premia a quienes llegaron primero. Recuerda a quienes construyeron las infraestructuras sobre las que todos los demás terminaron operando.

Los vikingos alcanzaron América siglos antes que Colón, pero su llegada no transformó el mundo. No construyeron puertos, rutas comerciales estables ni una red capaz de sostener un flujo continuo. Roma siguió un camino distinto: su poder no descansó solo en sus legiones, sino en una extraordinaria red de calzadas, puertos y normas comunes que integró territorios y facilitó el intercambio durante siglos. Las legiones se fueron. Los caminos permanecieron. El derecho romano permaneció.

Hoy, mientras gobiernos y empresas compiten por regresar a la Luna, la atención sigue centrada en los elementos visibles: cohetes gigantes, aterrizajes tripulados y banderas. Pero la verdadera cuestión estratégica es otra.

La mayoría de los debates actuales siguen centrados en la misma pregunta que dominó la era Apolo: quién llegará a la Luna y cuándo lo hará.

Pero la verdadera carrera lunar no consiste en repetir las hazañas de Apollo. Ya hemos llegado primero. Consiste en quien establece la primera infraestructura logística permanente capaz de definir los estándares operativos del espacio cislunar.

Porque quien construya la primera red logística no solo moverá carga y personas. Definirá las rutas, las interfaces, los protocolos y las normas sobre las que los demás tendrán que operar durante décadas.

La ventana de oportunidad

A lo largo de la historia, las grandes transformaciones tecnológicas suelen producirse durante breves periodos en los que convergen circunstancias excepcionales. Durante esos periodos se establecen infraestructuras, se ocupan posiciones estratégicas y se definen los estándares que pueden perdurar durante generaciones. Después, la ventana se cierra. La red eléctrica. Internet.

Por primera vez en la era espacial coinciden tres factores decisivos: rivalidad geopolítica entre Estados Unidos y China, sistemas de lanzamiento reutilizables de gran capacidad y madurez tecnológica suficiente para construir infraestructura lunar básica. Ninguno de ellos es completamente nuevo. Lo extraordinario es que aparecen simultáneamente.

Esta convergencia ha abierto una ventana histórica. Pero las ventanas de oportunidad no se cierran solas con el paso del tiempo: se cierran cuando alguien las aprovecha. La primera potencia que consiga establecer una infraestructura operativa y sostenible obtendrá una ventaja estructural difícil de igualar: la capacidad de definir los estándares que otros encontrarán más fácil adoptar que reemplazar.

Dos problemas diferentes

Existe una confusión extendida: asumir que una arquitectura capaz de realizar misiones lunares es también adecuada para sostener una presencia permanente. Pero no son el mismo problema.

Una arquitectura de misión está diseñada para maximizar la probabilidad de éxito de una operación concreta. Su objetivo es transportar una tripulación o una carga desde un origen hasta un destino y completar una secuencia determinada de actividades. La eficiencia se mide en términos de éxito de la misión.

Una arquitectura de permanencia está optimizada para sostener un flujo continuo de personas, equipos, consumibles y recursos durante décadas. La eficiencia ya no se mide por el éxito de una operation aislada, sino por la capacidad del sistema para mantener actividad de forma estable, predecible y scalables.

Artemis, en su configuración actual, es una arquitectura de misión.

El cuello de botella: Orion y la órbita de Gateway

Orion no puede entrar en órbita lunar baja (LLO). Su motor principal no tiene suficiente empuje ni delta V para realizar una inserción en LLO y una posterior salida hacia la Tierra **(1)**. Orion es demasiado pesada, su sistema de propulsión demasiado limitado, y su capacidad de carga demasiado pequeña para operar en el entorno lunar de forma autónoma **(2)**.

La solución de la NASA ha sido crear una órbita a medida: la Near Rectilinear Halo Orbit (NRHO), o "órbita de Gateway" **(2)**. Es una órbita inestable que orbita alrededor de la Luna a una distancia de varios miles de kilómetros. Su ventaja real es que requiere muy poco delta V para entrar y salir. Es decir, NRHO no es la órbita óptima para la exploración lunar. Es la órbita óptima para Orion.

Al situar el punto de encuentro en NRHO, la NASA obliga al módulo de aterrizaje (HLS) a cubrir el tramo restante: desde NRHO hasta la superficie y de vuelta. Y eso no es un viaje corto. Son 2.700 m/s para bajar y otros 2.700 m/s para subir. Además, el HLS tiene que llegar desde la Tierra hasta NRHO, lo que añade otros 3.600 metros por segundo. En total, el HLS tiene que acumular 9.000 m/s de delta V en una sola misión.

Esa cifra es el verdadero enemigo de Artemis. Porque la ecuación de Tsiolkovski, la ley fundamental de la propulsión espacial, no es lineal. Es logarítmica. Aun con un Isp de 380 segundos y una fracción estructural excepcionalmente buena, un solo vehículo que tenga que cubrir 9.000 m/s tiene una carga útil demasiado limitada. Por eso el HLS necesita entre 12 y 16 lanzamientos de repostaje por misión **(3)**. No porque SpaceX lo haga mal, sino porque la arquitectura le obliga a luchar contra la ecuación de Tsiolkovski en su régimen más penalizador. Y fue el propio Tsiolkovski quien sugirió la solución hace más de un siglo: dividir los grandes ΔV en tramos más pequeños.

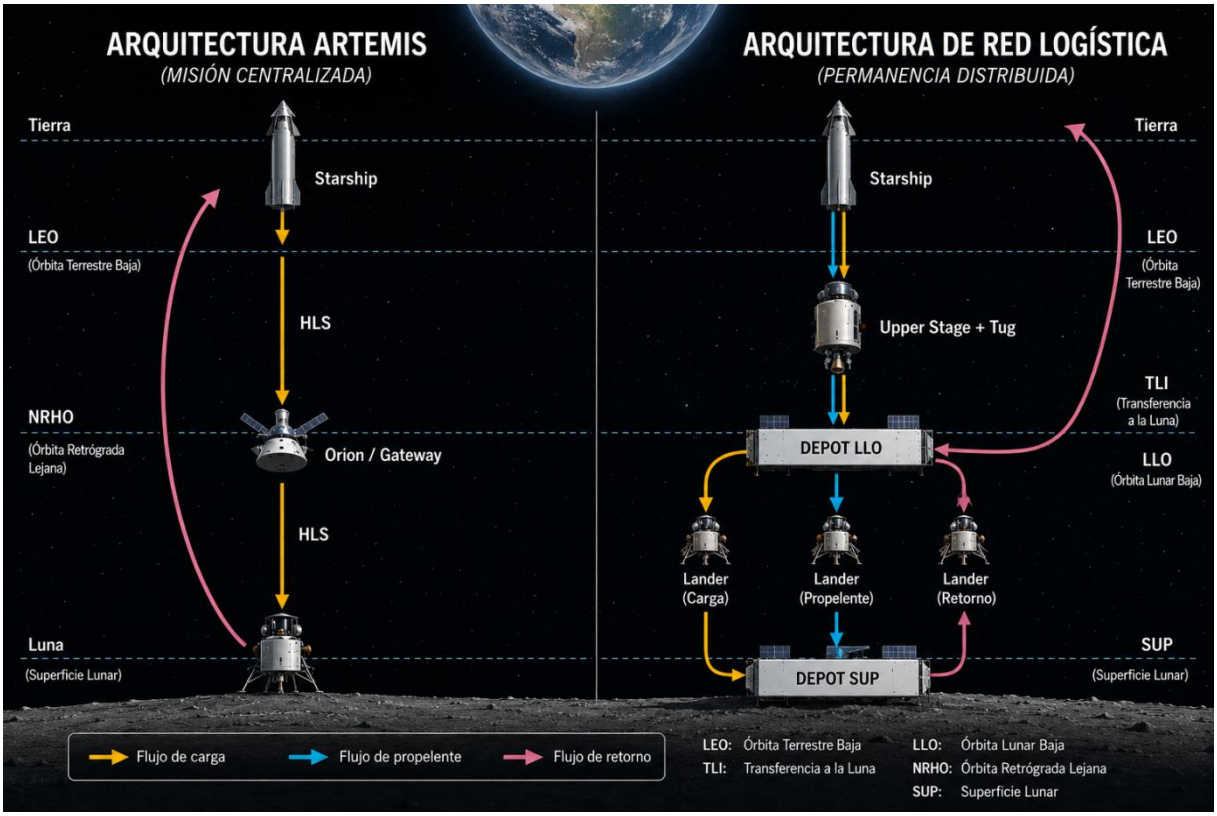
La alternativa: una red logística

La solución no pasa por un vehículo más grande ni por más repostajes. Pasa por cambiar la arquitectura: dividir el viaje en nodos y tramos naturales, cada uno

atendido por vehículos especializados. Cuando se hace eso, la arquitectura comienza a reorganizarse por sí sola.

La base topológica de la Red consta de nodos. Estos serán:

- La superficie terrestre (KSC).
- La órbita terrestre baja (LEO).
- La órbita lunar baja (LLO). Allí colocaremos un depósito de propelentes y carga.
- La superficie lunar (SUP). Allá construiremos otro depósito de propelentes.



Primer tramo: de KSC a LEO

La existencia de lanzadores reutilizables de enorme capacidad de carga a LEO es parte esencial de la ventana de oportunidad que estamos atravesando. Para este ejemplo adoptamos la Starship. Pero cualquier otra elección hubiese sido igual de valida.

Según SpaceX este portador tendrá una capacidad en el rango de las 100 a 200 toneladas **(4)**. Adoptaremos el supuesto de que la starship nos deja 150T de payload en LEO. Pero la red no depende de una cantidad de payload en LEO específica, lo mismo que desarrollaremos en este ejemplo para 150T se aplica en forma totalmente indistinta a 100T, 60T o 200T.

Segundo tramo: de LEO a TLI

El salto entre la órbita terrestre baja y la trayectoria translunar requiere aproximadamente 3,1 km/s. Es el tramo más exigente de toda la red y también aquel en el que los propelentes criogénicos ofrecen su máxima ventaja.

Partiendo de una capacidad de carga de 150 toneladas en LEO, una etapa superior criogénica desechable basada en tecnología actual puede colocar aproximadamente 68 toneladas en trayectoria translunar (TLI).

No se trata de una preferencia tecnológica. Es una consecuencia directa de utilizar el sistema más eficiente disponible allí donde el requerimiento energético es máximo. La etapa cumple una única función, opera durante unas pocas horas y desaparece. No necesita repostaje orbital, almacenamiento prolongado ni transferencia de propelentes criogénicos.

Tercer tramo: de TLI a LLO

Una vez alcanzada la trayectoria translunar aparece un problema completamente distinto.

Ahora solo necesitamos unos 900 m/s para capturar la carga en órbita lunar baja. Ya no estamos ante una etapa desechable sino ante una ruta permanente entre dos nodos fijos de la red.

Aplicando la ecuación de Tsiolkovski con un motor hipergólico moderno de Isp = 340 s y una fracción estructural razonable del 20%, las 68 toneladas que llegan a TLI producen un resultado sorprendente: un vehículo con apenas unas 4 toneladas de masa seca, unas 17 toneladas de propelente y capacidad para entregar aproximadamente 47 toneladas de carga útil en LLO.

Así aparece el *Tug*.

No porque alguien decidiera diseñar un remolcador espacial, sino porque la existencia de una ruta repetitiva entre dos nodos permanentes hace que un vehículo especializado resulte la solución más eficiente. Su función es simple: transportar carga y propelente entre la trayectoria translunar y la órbita lunar. Y luego de reabastecerse en LLO, impulsar la carga procedente de la Luna en una trayectoria de reentrada a la Tierra.

Cuarto tramo: de LLO a la superficie

Aterrizaje, carga y descarga, operaciones de superficie, ascenso y descenso. Por primera vez aparece un entorno operativo específico.

Aplicando nuevamente la ecuación de Tsiolkovski con propelentes hipergólicos y una fracción estructural conservadora del 26%, emerge un lander con aproximadamente 14 toneladas de masa seca y 39 toneladas de propelente.

Aquí aparece la diferencia fundamental entre una arquitectura de misión y una arquitectura de red.

Una misión obliga al vehículo a transportar simultáneamente el combustible de descenso y el combustible de ascenso. Una red permite repostar en los nodos.

Si el lander debe descender directamente desde la trayectoria translunar, puede entregar del orden de 16 toneladas de carga útil a la superficie.

Pero si existe un depósito de propelentes en órbita lunar y otro en superficie, descenso y ascenso se convierten en operaciones independientes. El mismo vehículo pasa entonces a transportar aproximadamente 37 toneladas de carga útil entre LLO y la superficie lunar. Más del doble. No porque el vehículo sea diferente, sino porque la red existe.

Y en cada regreso al depósito de LLO puede subir decenas de toneladas procedentes de la Luna. Y desde allí, mediante el Tug hipergólico, llevarlas a la Tierra.

La existencia de depósitos de propelente

Los depósitos no son una característica añadida a la arquitectura. Son una consecuencia lógica de la existencia de una red logística.

En una arquitectura de misión, una única nave tiene que transportar carga hacia la luna, volver carga a la tierra y todo eso transportando toneladas de propelentes que permitan estas maniobras. La característica de la red logística es que existen tres flujos desacoplados materialmente: el flujo de carga ascendente, de la Tierra a la Luna, el de carga descendente, de la Luna a la Tierra y el flujo de propelentes.

La misma lógica aparece en cualquier sistema de transporte maduro. Puertos, estaciones ferroviarias, centros logísticos y almacenes existen porque los flujos deben desacoplarse de los tiempos de producción y consumo.

La Luna no debe ser una excepción.

La Red de Superficie

Nuestro primer lanzamiento directo a la superficie lunar, es la semilla de lo que será nuestra Red de Superficie. Y su payload estará compuesto por un reactor nuclear tipo Fission Surface Power o un micro-reactor espacial **(5)** y el hardware necesario para interconectar los Landers aterrizados en la superficie lunar en una Red de Superficie.

Esta red de superficie conectará entre sí los depósitos de propelente de los landers, creando un Depot de SUP distribuido. En lugar de transportar tanques gigantes y bombas, válvulas, presurizantes, aviónica, paneles solares, radiadores, etc., por separado y construir un depósito de propelentes para abastecer a los landers (una tarea monumental y compleja), aprovechamos el simple hecho de que los landers YA LLEVAN TODO ESO INCORPORADO.

Interconectando los landers mediante una manguera que transporte en su núcleo una tubería flexible de solución de glicol, calentada con el remanente de calor del reactor nuclear (que de otra forma debería ser radiado inútilmente), rodeada a su vez de conducciones para N_2O_4, MMH, helio, electricidad y datos y cubiertas por aislación y la protección adecuada (yo propongo simplemente enterrar la manguera en el regolito), ya estamos creando una Red de Superficie que, además de funcionar como Depot de propelentes, mantiene calientes los landers y comparte la producción de energía de sus paneles solares, la disipación de calor de sus radiadores, la capacidad de bombeo y la energía del reactor, eliminando el riesgo de congelación durante la noche lunar.

La instalación de balizas en cada lander genera un sistema de posicionamiento local autónomo, facilitando una expansión modular, rápida y de baja complejidad técnica. Ya estamos construyendo la Infraestructura Energética de nuestra futura Base Lunar.

El multiplicador ISRU

Nuestros motores funcionan empleando monometil hidracina (MMH) y tetróxido de dinitrógeno (N_2O_4). Uno de los sistemas de propulsión bipropelente más utilizados en la industria aeroespacial. Su principal ventaja es que es hipergólica, lo que significa que los dos componentes se inflaman espontáneamente al entrar en contacto, sin necesidad de un sistema de encendido externo. Estos propelentes son líquidos estables a temperatura ambiente, no requieren criogenia ni presentan el problema del boiloff.

El 50% de la masa de los propelentes está formada por hidrógeno y oxígeno, que pueden obtenerse en la luna. El otro 50% son carbono y nitrógeno, que no se pueden obtener en la Luna. Bueno, si no hay C ni N_2 entonces los traemos de la Tierra. Son fáciles de transportar, compactos y muy estables.

Una planta ISRU con suministros procedentes de la Tierra duplica el peso de la importación entregando el doble de peso en propelentes directamente al depósito en la superficie lunar. Eso es un ahorro sustancial en comparación a traer todo el propelente desde la Tierra.

¿Funciona?

Pero todo esto debe evaluarse como sistema. ¿Puede la red sostener flujo continuo durante décadas? Hoy existe una herramienta habitual para responder este tipo de preguntas: la simulación informática.

Por ello se construyó un modelo operacional de la red y se la hizo funcionar. Este modelo ha sido desarrollado y simulado, con resultados cuantitativos disponibles en acceso abierto en el repositorio **(6)**.

En régimen nominal, con doce lanzamientos anuales de 150 toneladas a LEO, la red alcanzó un throughput estable de aproximadamente 240 toneladas anuales de carga útil entregada a la superficie lunar.

Al aumentar progresivamente el número de lanzamientos, el comportamiento permaneció prácticamente lineal:

- Unas 350 toneladas anuales con 18 lanzamientos;
- Más de 400 toneladas anuales con 20 lanzamientos.

Lo más interesante es que estos incrementos no requirieron rediseñar la arquitectura. La misma topología continuó funcionando bajo regímenes de carga significativamente mayores.

La simulación también permitió cuantificar el rendimiento global del sistema. Por cada 150 toneladas colocadas en LEO:

Etapa	Masa
LEO	150 t
TLI	68 t
LLO	47 t
Superficie Lunar	20 t

En términos prácticos, aproximadamente un 13% de la masa colocada en LEO termina llegando a la superficie lunar como carga útil. Incluso priorizando el flujo descendente, el sistema mantuvo capacidades de retorno del orden de decenas de toneladas anuales, estableciendo una auténtica logística bidireccional entre la Tierra y la superficie lunar.

Los caminos hacia la Luna

La Red Logística Bidireccional presentada en este artículo no pretende ser la única solución posible al problema lunar. Es simplemente un modelo. Un ejemplo de cómo podría diseñarse una infraestructura permanente cuando el objetivo deja de ser completar misiones aisladas y pasa a ser sostener un flujo continuo de personas, equipos, energía, recursos e información entre la Tierra y la Luna.

Sin duda existirán otras arquitecturas. Algunos propondrán diferentes órbitas. Otros utilizarán distintos propelentes, vehículos o configuraciones operativas. Y muchas de esas alternativas podrían resultar perfectamente válidas. Ese no es el punto.

El punto es que la construcción de redes permanentes parece haber abandonado definitivamente el terreno de la ciencia ficción. Nada de lo presentado aquí requiere motores warp, antigravedad ni tecnologías milagrosas.

- Los motores existen.
- Los sistemas de guiado existen.
- Los acoplamientos orbitales existen.
- Los reactores nucleares de superficie están en desarrollo.
- Los depósitos orbitales, los remolcadores espaciales y los vehículos reutilizables son extensiones naturales de tecnologías que, en muchos casos, llevan décadas en servicio.
  Los desafíos técnicos siguen siendo enormes. Nadie debería subestimarlos. Diseñar, construir y operar una infraestructura lunar permanente será una de las empresas de ingeniería más complejas jamás intentadas por nuestra especie. Pero complejidad no significa imposibilidad. Y ésa es precisamente la razón por la que la ventana de oportunidad actual resulta tan importante.

Porque la primera red no será simplemente un sistema de transporte. Será una infraestructura fundacional.

Quien construya la primera red logística permanente obtendrá algo mucho más valioso que una colección de vehículos o una serie de misiones exitosas. Obtendrá la capacidad de ocupar de forma efectiva los nodos estratégicos del espacio cislunar y de la superficie lunar. Obtendrá la capacidad de definir rutas. De establecer interfaces. De fijar protocolos operativos. De crear estándares.

Y la historia demuestra que los estándares suelen sobrevivir mucho más tiempo que las tecnologías que les dieron origen.

Los vikingos llegaron primero a América. Roma construyó caminos. La diferencia entre ambos fue la infraestructura.

La verdadera carrera lunar no consiste en realizar más misiones. Consiste en construir la primera red. Del mismo modo que el contenedor ISO definió el comercio

marítimo moderno y TCP/IP definió Internet, la primera red lunar tendrá la capacidad de definir quién pone las reglas.

Sección de Referencias

- `[1]` **NASA Flight Mission Design:** Las limitaciones de la capacidad de combustible y masa de Orion para misiones cis-lunares autónomas detalladas en el reporte oficial de diseño *Evolution of Orion Mission Design for Artemis* (NASA Technical Reports Server). [1]
- `[2]` **Orion Main Engine Specifications:** Detalles del motor AJ10-190 de Aerojet Rocketdyne (reutilizado del transbordador espacial), su empuje limitado de 26.7 kN y su bajo rendimiento relativo que forzaron la elección de la órbita NRHO *Aerojet AJ10 Engine Family Legacy and Orion Integration* (SpaceNews / Wikipedia). [1, 2, 3]
- `[3]` **Artemis HLS Architecture & Refueling:** Evaluaciones de la arquitectura de misiones Artemis y el número estimado de lanzamientos de tanqueros necesarios para mitigar el presupuesto de delta-V *NASA Artemis Program Framework and Starship HLS Status* (The Space Review / Reddit). [1]
- `[4]` **SpaceX Starship Payload Capability:** Especificaciones oficiales de la capacidad de masa útil a LEO en régimen reutilizable (100–150+ toneladas) de SpaceX *Starship Users Guide & Technical Specifications* (SpaceX).
- `[5]` **Space Micro-Reactor Programs:** El estado de desarrollo de micro-reactores nucleares lunares comerciales y de defensa, incluyendo los conceptos presentados por Rolls-Royce y el programa Kilopower de la NASA *Rolls-Royce Space Micro-Reactor Exploration Model* (Rolls-Royce Official / UK Space Agency). [1, 2]
- `[6]` **The Quantitative Dataset:** El repositorio público de datos de simulación y el paper conceptual completo del autor Lunar Logistics Network: A Persistent Infrastructure for the Lunar Base (*https://doi.org/10.5281/zenodo.20584985*) (p. 1).